

Pengaruh Interlayer Zn terhadap struktur mikro dan sifat mekanik pengelasan GMAW material baja karbon sedang ST37

Siska Irma Budianti¹, Lingga Arti Saputra², Nota Ali Sukarno³, Carolus Borromeus Krishna Sampurno⁴, Abdul Azis⁵, Herlian Seto Margono⁶

¹Teknik Mesin, Universitas Perwira Purbalingga

Penulis Korespondensi : Carolus Borromeus Krishna Sampurno (carolus@unperba.ac.id)

ABSTRAK

Proses pengelasan Gas Metal Arc Welding (GMAW) merupakan metode yang banyak digunakan dalam industri pengelasan logam ferro dan non-ferro karena efisiensi waktu, kemudahan pengoperasian, dan biaya yang relatif terjangkau. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi arus pengelasan dan penambahan interlayer seng (Zn) terhadap sifat mekanik hasil pengelasan kampuh V pada baja karbon sedang ST37. Material penelitian berupa dua pelat baja ST37 berukuran 250 × 120 × 6 mm dengan celah kampuh 2 mm, serta lembaran interlayer Zn sepanjang 250 mm. Pengelasan dilakukan menggunakan arus 80 A, 100 A, dan 120 A. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa kekuatan tarik tertinggi tanpa interlayer Zn dicapai pada arus 120 A sebesar 418,9 MPa, sedangkan dengan interlayer Zn mencapai 451,1 MPa pada arus yang sama. Pengujian kekerasan pada daerah Base Metal (BM), Heat Affected Zone (HAZ), Weld Metal 1 (WM1), dan Weld Metal 2 (WM2) menunjukkan nilai kekerasan tertinggi sebesar 166 HV pada WM2 tanpa Zn pada arus 120 A. Penambahan interlayer Zn terbukti meningkatkan kekuatan tarik sambungan las pada arus tertinggi, sedangkan kekerasan tertinggi tetap tercapai pada spesimen tanpa interlayer Zn.

KATA KUNCI Baja ST37, GMAW, Kekerasan, Kekuatan Tarik, Variasi Arus.

1. PENDAHULUAN

Penyambungan material logam, khususnya baja karbon sedang, merupakan aspek krusial dalam berbagai sektor industri, termasuk konstruksi, manufaktur alat berat, otomotif, serta industri maritim dan perkapalan. Dalam konteks pembangunan infrastruktur dan sistem transportasi laut, baja karbon sedang sering digunakan sebagai material utama karena kombinasi sifat mekanik yang unggul dan ketersediaannya yang melimpah [1]. Material ini memiliki kekuatan tarik yang tinggi, keuletan yang baik, serta ketangguhan yang stabil pada suhu rendah. Selain itu, kemampuan las yang baik menjadikan baja karbon sedang sebagai pilihan ideal dalam proses fabrikasi dan perakitan komponen struktural [2].

Beragam metode penyambungan telah dikembangkan dan digunakan, seperti Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) [3], Gas Metal Arc Welding (GMAW) [4], Submerged Arc Welding (SAW) [5], dan Flux Cored Arc Welding (FCAW) [6]. Salah satu metode yang juga cukup populer adalah Shielded Metal Arc Welding (SMAW) [7]. Meskipun SMAW dikenal sebagai metode yang sederhana dan murah, kelemahannya adalah seringnya penggantian elektroda

yang memakan waktu lebih lama [8]. Sementara itu, GMAW menjadi salah satu proses yang banyak digunakan pada pengelasan logam ferro dan non-ferrous [9], karena memiliki beberapa keunggulan, di antaranya: kemudahan pengoperasian, penetrasi yang lebih baik, dan pengendalian kualitas yang lebih mudah [10].

Meskipun demikian, kualitas sambungan las yang dihasilkan oleh metode GMAW dipengaruhi oleh berbagai parameter proses. Faktor-faktor penting seperti jenis logam pengisi, komposisi gas pelindung, arus dan tegangan pengelasan, polaritas, kecepatan pengelasan, serta kondisi permukaan logam dasar berperan signifikan dalam menentukan sifat akhir dari sambungan [10]. Salah satu parameter kritis yang sering kali diabaikan adalah *root gap* atau celah awal antara dua material yang akan disambung. Celah ini berperan penting dalam mengontrol penetrasi las, pembentukan akar las, serta kestabilan dimensi hasil lasan [11]. Ketidaktepatan dalam pengaturan *root gap* dapat menyebabkan cacat seperti lack of fusion, porositas, maupun *root crack* yang pada akhirnya menurunkan kekuatan sambungan dan menimbulkan potensi kegagalan struktur [12].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai strategi telah dikembangkan, salah satunya dengan memodifikasi jenis dan komposisi logam pengisi. Penggunaan kawat pengisi dengan inti logam (metal-cored wire) diketahui dapat memberikan beberapa keunggulan dibandingkan kawat padat, seperti peningkatan kedalaman penetrasi, pengurangan percikan, kontrol panas yang lebih baik, serta pembentukan mikrostruktur yang lebih seragam pada zona las [13]. Penambahan unsur paduan seperti silikon (Si), nikel (Ni), kromium (Cr), dan mangan (Mn) dalam logam pengisi juga dilaporkan dapat meningkatkan sifat mekanik hasil lasan, memperbaiki ketahanan korosi, serta mengurangi kemungkinan terbentuknya cacat mikrostruktural [14]. Namun, salah satu pendekatan yang masih relatif jarang dieksplorasi adalah penggunaan interlayer logam, seperti seng (Zn), pada sambungan las. Seng merupakan unsur logam yang umumnya digunakan sebagai lapisan pelindung terhadap korosi (galvanisasi), namun potensinya sebagai lapisan antarmuka dalam proses pengelasan masih terbuka untuk diteliti lebih lanjut. Penambahan lapisan seng sebagai interlayer dapat memengaruhi fenomena perpindahan panas, difusi antar elemen, pembentukan fasa intermetalik, serta evolusi mikrostruktur di zona pengaruh panas (HAZ) dan zona fusi. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana interlayer Zn dapat berkontribusi terhadap pembentukan struktur mikro dan sifat mekanik sambungan, khususnya pada pengelasan baja karbon sedang dengan metode GMAW

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penambahan interlayer seng (Zn) terhadap struktur mikro dan sifat mekanik hasil pengelasan baja karbon sedang menggunakan proses GMAW. Dengan menganalisis parameter seperti morfologi zona fusi, distribusi kekerasan, kekuatan tarik, serta kemungkinan terbentuknya cacat mikrostruktural, diharapkan penelitian ini dapat memberikan wawasan baru dalam pengembangan teknologi penyambungan logam. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam peningkatan kualitas sambungan las untuk aplikasi di bidang konstruksi, industri manufaktur, dan maritim, di mana keandalan struktur menjadi aspek yang tidak dapat ditawar.

2. BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilakukan menggunakan peralatan dan bahan yang tersedia di Workshop SMKN Jateng. Mesin las yang digunakan adalah mesin las Metal Inert Gas (MIG), didukung oleh gas pelindung Argon untuk proses pengelasan. Proses pembuatan kampuh V pada spesimen dilakukan menggunakan kikir besi, sedangkan sudut kemiringan fillet diukur dengan busur derajat. Untuk analisis kekerasan, digunakan mesin uji Micro Vickers dengan beban 0.3 kg, sesuai standar ASTM E8. Pengamatan struktur makro dan mikro pada area lasan dilakukan menggunakan Olympus/ SZ 1145 TR dan Holland microscope, yang dilengkapi mikroskop elektron untuk memeriksa zona HAZ (Heat Affected Zone), WM (Weld Metal), dan BM (Base Metal). Uji

kekuatan tarik-geser dilakukan dengan menggunakan Ultimate Testing Machine.

Variabel dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga kategori: variabel bebas, terikat, dan kontrol. Variabel bebas yang ditetapkan adalah variasi arus pengelasan, yaitu 80 A, 100 A, dan 120 A, dengan sudut kampuh konstan pada 60°. Variabel terikat terdiri dari kekerasan, struktur makro dan mikro, serta nilai uji tarik hasil pengelasan. Sedangkan variabel kontrol meliputi bentuk spesimen uji tarik yang mengacu pada standar ASTM E8 dan penggunaan bahan Baja Karbon Sedang dengan ketebalan 6 mm.

Pembuatan spesimen dimulai dengan menyiapkan dua pelat Baja Karbon Sedang berdimensi 250 x 130 x 6 mm. Pelat dicekam pada ragum, lalu dilakukan pengikiran pada ujung benda kerja untuk membentuk fillet. Derajat kemiringan fillet diukur dengan busur derajat untuk memastikan konsistensi spesimen. Setelah spesimen siap, proses pengelasan GMAW dilakukan.

Tabel 1. Jumlah spesimen uji

| No. | Pengujian Material | Tanpa Interlayer Zn | Dengan Interlayer Zn | Jumlah Spesimen |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| 1 | Struktur Makro | 3 | 3 | 6 |
| 2 | Struktur Mikro | | | |
| 3 | Uji Vickers | 3 | 3 | 6 |
| 4 | Uji Tarik Geser | | | |
| Total Keseluruhan Spesimen Uji | | | | 12 |

Proses pengelasan dilakukan dengan terlebih dahulu menyiapkan pelat baja karbon sedang yang akan disambung. Celah sambungan (root gap) disetel sebesar 2 mm untuk masing-masing pasangan pelat. Untuk spesimen dengan interlayer, disisipkan lembaran seng (Zn) sepanjang 400 mm secara tepat di tengah celah sambungan. Untuk memastikan posisi interlayer tidak bergeser selama proses pengelasan, kedua ujung pelat diikat menggunakan tek weld (tack welding).

Pengelasan dilakukan menggunakan metode Gas Metal Arc Welding (GMAW) dengan gas pelindung Argon murni dan kawat las elektroda padat sebagai bahan pengisi. Tiga variasi arus digunakan dalam penelitian ini, yaitu 80 A, 100 A, dan 120 A, untuk mengevaluasi pengaruh input panas terhadap karakteristik sambungan las.

Pengelasan dilakukan secara berlapis (multi-pass). Lapisan pertama (root pass) difokuskan untuk mencapai penetrasi penuh hingga bagian belakang sambungan. Setelah itu, dilakukan pengelasan lapisan-lapisan berikutnya (filler pass dan capping pass) untuk mengisi celah sepenuhnya dan menyempurnakan profil permukaan sambungan. Setelah proses pengelasan selesai, spesimen diangkat menggunakan tang penjepit dan dibiarkan mendingin secara alami (air cooling) di atas meja kerja pada suhu ruang. Spesimen yang telah dingin kemudian dipotong sesuai kebutuhan pengujian dan dilanjutkan ke tahap preparasi sampel untuk

pengujian makrostruktur, mikrostruktur, kekerasan, dan tarik geser.

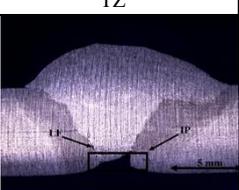
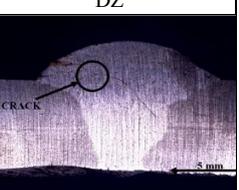
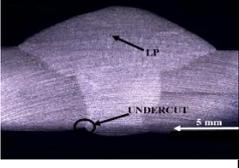
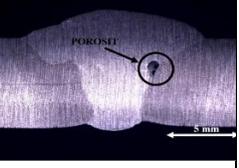
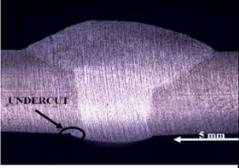
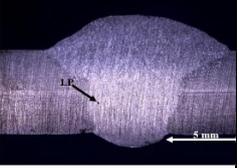
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian makro

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan interlayer Zn dalam pengelasan GMAW menghasilkan variasi jenis cacat las pada arus yang berbeda. Pada arus 80 A, ditemukan cacat *Incomplete Penetration* dan *Lack of Fusion* terutama di area akar las (root), serta muncul retak (cracks) pada logam las (weld metal). Hal ini mengindikasikan bahwa input panas yang diberikan pada arus ini belum cukup untuk melelehkan dan mengisi celah antar sambungan secara menyeluruh. Celah sempit yang tidak terisi dengan sempurna cenderung menyebabkan kurangnya fusi antar logam dasar dan logam pengisi, yang dapat menurunkan kekuatan sambungan secara signifikan.

Sementara itu, pada arus 100 A, cacat dominan yang ditemukan adalah *undercut* pada sisi luar lasan dan *lack of penetration* di bagian akar. Selain itu, terlihat pula **porositas** di dalam logam las. Kehadiran pori-pori ini menunjukkan adanya gangguan dalam aliran gas pelindung serta distribusi panas yang kurang merata selama proses pengelasan. Hal ini bisa disebabkan oleh penguapan seng yang berlebihan pada temperatur menengah, yang menghasilkan gas sisa dan menghambat peleburan sempurna logam.

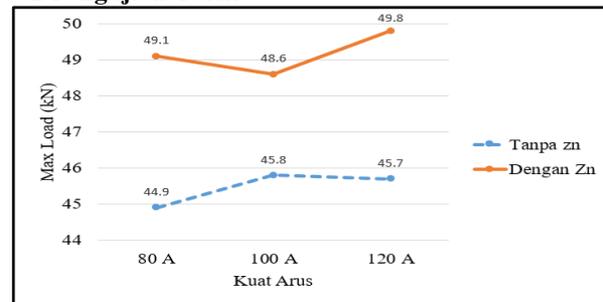
Tabel 2. Hasil Pengujian Struktur Makro

| Amper | TZ | DZ |
|--------------|---|---|
| 80 A (1) |  |  |
| 100 A (2) |  |  |
| 120 A (3) |  |  |

Pada arus 120 A, input panas yang tinggi justru menyebabkan cacat *undercut* yang lebih besar di perbatasan antara Heat-Affected Zone (HAZ) dan Weld Metal (WM). Selain itu, ditemukan *Slag Inclusion* di dalam logam las, yang disebabkan oleh pembentukan terak yang tidak sepenuhnya keluar dari kolam las akibat dinamika aliran logam cair yang tidak stabil. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun arus yang tinggi dapat meningkatkan penetrasi, namun jika tidak dikendalikan, justru akan menimbulkan cacat yang lebih kompleks akibat panas berlebih.

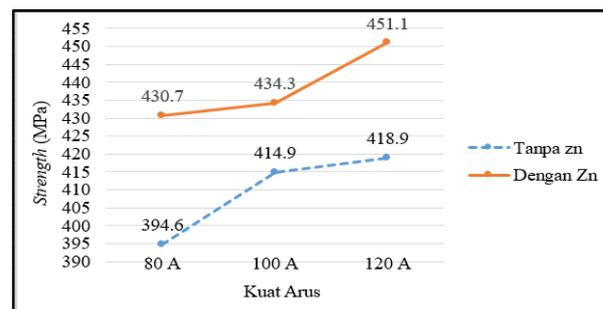
Secara umum, penambahan interlayer Zn terbukti memberikan kontribusi dalam memfasilitasi pengisian celah antar logam dasar, terutama pada parameter arus yang sesuai. Interlayer ini membantu meningkatkan wetting dan memodifikasi karakteristik leleh di zona sambungan. Namun demikian, pengaturan arus pengelasan tetap menjadi faktor kunci dalam mengontrol distribusi panas, pembentukan struktur fasa, dan munculnya cacat las..

3.2 Pengujian Tarik



Gambar 1. Grafik Max Load (kN)

Pengujian tarik merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik sambungan las V-Groove akibat perubahan struktur mikro dari proses pengelasan.



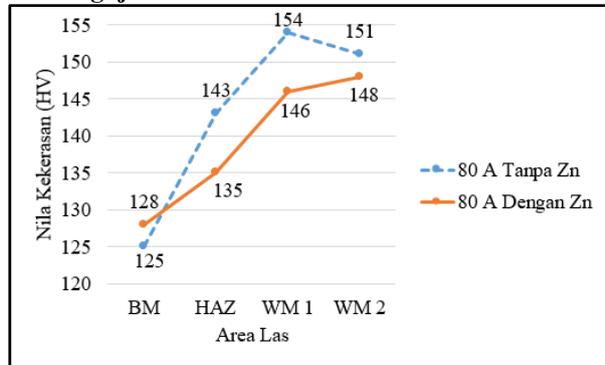
Gambar 2. Grafik Pengujian Tarik (MPa)

Gambar 1 dan 2 menunjukkan bahwa nilai uji tarik tertinggi pada spesimen tanpa Zn berada pada arus 120 A, sebesar 418,9 MPa, sedangkan nilai terendah pada 80 A sebesar 394,9 MPa. Nilai Max Load (kN) tertinggi pada 100 A tanpa Zn sebesar 45,8 kN, dan nilai terendah pada 80 A sebesar 44,9 kN. Pada spesimen dengan interlayer Zn, nilai uji tarik tertinggi tercatat pada 120 A yaitu 451,1 MPa, dan nilai terendah pada 80 A sebesar 430,7 MPa. Nilai Max Load tertinggi pada 120 A dengan Zn adalah 49,8 kN, dan nilai terendah pada 100 A sebesar 48,6 kN. Hasil ini mengindikasikan bahwa penggunaan interlayer Zn secara signifikan meningkatkan sifat mekanis sambungan las. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa penambahan Zn mampu meningkatkan kekuatan las secara progresif saat Zn mencair dan tersebar di area pengelasan.

Zona patah pada spesimen tanpa Zn terletak pada area HAZ, terutama pada arus 80 A, baik tanpa Zn maupun dengan Zn. Hal ini terkait dengan adanya cacat las yang mempengaruhi kekuatan pada zona tersebut. Sedangkan pada spesimen dengan arus 100 A dan 120

A, baik yang menggunakan Zn maupun tidak, lokasi patah terletak pada daerah Base Metal (BM). Ini menunjukkan bahwa kekuatan las sudah cukup baik dan kegagalan tidak terjadi pada sambungan las, melainkan pada material induk itu sendiri.

3.3 Pengujian Keras



Gambar 3. Grafik Uji Keras 80 A

Gambar 3 menyajikan hasil uji kekerasan mikro (Vickers Hardness) pada spesimen sambungan las dengan arus pengelasan 80 A, yang mencakup tiga zona utama: Base Metal (BM), Weld Metal (WM), dan Heat-Affected Zone (HAZ). Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan kekerasan akibat proses pengelasan, baik pada spesimen dengan maupun tanpa interlayer Zn.

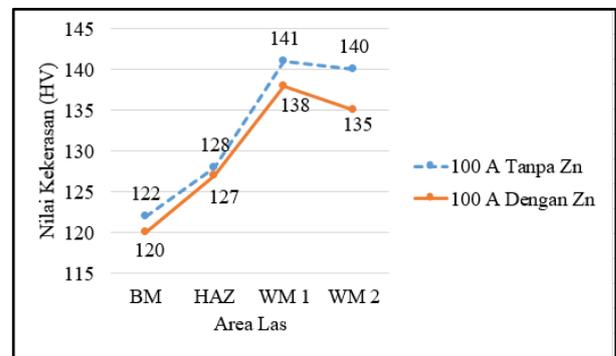
Pada spesimen tanpa Zn, nilai kekerasan tertinggi dicapai sebesar 154 HV di zona WM, sementara nilai kekerasan terendah sebesar 125 HV terdapat di zona BM. Nilai kekerasan yang tinggi di area WM mencerminkan terbentuknya struktur hasil las yang lebih keras akibat perpaduan antara pemanasan dan pendinginan cepat, meskipun pada arus rendah, hal ini masih cukup signifikan. Sebaliknya, nilai kekerasan rendah di zona BM menunjukkan bahwa daerah ini tetap mempertahankan sifat asli logam dasar karena tidak terpengaruh langsung oleh panas pengelasan.

Pada spesimen dengan interlayer Zn, nilai kekerasan tertinggi adalah 148 HV di zona WM, dan nilai terendah sebesar 128 HV di zona BM. Penurunan nilai maksimum dibandingkan spesimen tanpa Zn menunjukkan bahwa penambahan interlayer Zn pada arus rendah belum sepenuhnya memberikan kontribusi peningkatan kekerasan, seperti yang terjadi pada arus lebih tinggi. Hal ini dapat disebabkan oleh kurangnya input panas, sehingga difusi seng (Zn) ke dalam logam las kurang optimal untuk membentuk senyawa intermetalik yang signifikan.

Perbedaan kekerasan antar zona disebabkan oleh perubahan struktur mikro selama proses pengelasan. Zona WM, yang mengalami peleburan dan solidifikasi, cenderung membentuk butiran kasar yang lebih keras dibandingkan zona HAZ dan BM. Sementara zona BM, karena tidak mengalami transformasi termal yang berarti, tetap mempertahankan struktur aslinya yang lebih lunak.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa pengaruh interlayer Zn dan variasi

arus pengelasan memiliki hubungan erat dengan distribusi kekerasan pada sambungan las. Pada arus rendah seperti 80 A, efek interlayer Zn terhadap peningkatan kekerasan masih terbatas, dan kestabilan struktur mikro menjadi faktor dominan yang memengaruhi kekerasan lokal [15].



Gambar 4. Grafik Uji Keras 100 A

Gambar 4 menunjukkan grafik distribusi nilai kekerasan pada berbagai zona spesimen las, yaitu Base Metal (BM), Heat-Affected Zone (HAZ), dan Weld Metal (WM), untuk arus pengelasan 100 A, baik pada spesimen dengan maupun tanpa interlayer Zn.

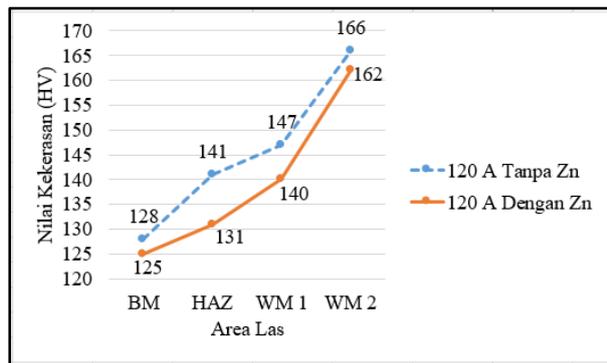
Pada spesimen tanpa interlayer Zn, nilai kekerasan tertinggi tercatat sebesar 138 HV yang terletak di area WM, sedangkan nilai terendahnya sebesar 122 HV terdapat pada BM. Sebaliknya, pada spesimen dengan interlayer Zn, nilai kekerasan maksimum meningkat menjadi 141 HV pada WM, sedangkan nilai minimum sedikit lebih rendah, yaitu 120 HV, yang juga berada di area BM.

Peningkatan kekerasan pada zona las (WM) akibat penambahan interlayer Zn dapat dijelaskan oleh pembentukan senyawa intermetalik Fe-Zn, seperti $FeZn_{13}$ atau $FeZn_7$, yang dikenal memiliki karakteristik keras namun getas. Intermetalik ini terbentuk akibat reaksi difusi seng (Zn) ke dalam lelehan besi (Fe) saat proses pengelasan berlangsung. Kristalisasi halus yang terjadi di zona WM—yang ditunjukkan sebagai zona WM1—menyebabkan peningkatan kekerasan secara lokal. Struktur mikro di zona ini cenderung lebih halus akibat proses pendinginan cepat serta kontribusi dari senyawa intermetalik yang terbentuk selama solidifikasi.

Namun, penting dicatat bahwa meskipun nilai kekerasan meningkat, keberadaan intermetalik Fe-Zn juga berpotensi menyebabkan kegagalan getas, terutama jika senyawa tersebut terkonsentrasi dalam bentuk fasa rapuh yang tidak homogen. Oleh karena itu, pemilihan arus dan waktu interaksi panas perlu dioptimalkan agar interlayer Zn dapat berfungsi maksimal tanpa mengorbankan ketangguhan struktur las.

Secara umum, uji kekerasan ini menunjukkan bahwa interlayer Zn memiliki pengaruh nyata terhadap perubahan sifat mekanik lokal pada sambungan las. Hal ini dapat menjadi strategi potensial untuk memperbaiki performa struktur las dalam aplikasi yang membutuhkan

kekerasan tinggi, asalkan karakteristik fasa yang terbentuk dikendalikan dengan tepat.



Gambar 5. Grafik Uji Keras 120 A

Gambar 5 menunjukkan hasil uji kekerasan mikro (Vickers Hardness) pada tiga zona utama sambungan las, yaitu Base Metal (BM), Heat-Affected Zone (HAZ), dan Weld Metal (WM), untuk spesimen yang dilas dengan arus 120 A, baik dengan maupun tanpa penambahan interlayer Zn.

Pada spesimen tanpa interlayer Zn, nilai kekerasan tertinggi ditemukan pada area WM sebesar 166 HV, sedangkan nilai kekerasan terendah sebesar 128 HV yang terdapat pada BM. Sementara itu, pada spesimen dengan interlayer Zn, nilai kekerasan maksimum tercatat sebesar 162 HV di area WM, dan nilai minimum sebesar 125 HV di area BM.

Kekerasan tinggi yang tercatat di WM, khususnya pada spesimen tanpa Zn, mengindikasikan terbentuknya struktur mikro yang padat dan keras akibat input panas yang tinggi. Hal ini didukung oleh kemungkinan terbentuknya butiran halus di area WM akibat laju pendinginan yang cepat serta transformasi fasa yang intens. Namun demikian, pada spesimen dengan Zn, meskipun nilai kekerasan tertinggi sedikit lebih rendah dibandingkan tanpa Zn, kecenderungan peningkatan kekerasan di zona WM tetap teramati dan dapat dikaitkan dengan pembentukan senyawa intermetalik Fe-Zn serta kemungkinan terjadinya refinement butiran akibat modifikasi lelehan oleh interlayer Zn.

Fenomena ini juga dapat dijelaskan melalui pengaruh morfologi butiran perlit. Semakin kecil jumlah butiran perlit yang terbentuk, maka akan berkurang pula kekuatan dan kekerasan material secara keseluruhan. Hal ini disebabkan oleh sifat perlit yang secara mikrostruktur memiliki fasa lamelar ferrite-cementite, yang dikenal kuat, keras, namun agak getas. Oleh karena itu, jika proporsi atau ukuran perlit berkurang akibat overheating atau pengaruh interlayer, maka penurunan kekerasan pada beberapa area dapat terjadi.

Hasil ini menunjukkan bahwa pada arus tinggi seperti 120 A, kontrol terhadap mikrostruktur akhir menjadi sangat penting. Meskipun kekerasan tinggi bisa dicapai, stabilitas struktur dan homogenitas fasa harus dijaga agar tidak menimbulkan potensi kegagalan getas atau konsentrasi tegangan pada sambungan las [16].

4. KESIMPULAN

Dari penelitian ini, penambahan interlayer Zn terbukti meningkatkan kekuatan tarik dan nilai kekerasan sambungan las GMAW. Penggunaan arus pengelasan yang lebih tinggi, yaitu 120 A, menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi baik dengan maupun tanpa Zn. Struktur mikro pada daerah sambungan las menunjukkan butiran yang lebih halus ketika menggunakan interlayer Zn. Hal ini disebabkan pembentukan senyawa Fe-Zn yang meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik. Secara keseluruhan, variasi arus dan penggunaan interlayer Zn sangat berpengaruh terhadap sifat mekanis dan struktur mikro hasil pengelasan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cho D W, Na S J, Cho M H and Lee J S 2013 A study on V-groove GMAW for various welding positions *J. Mater. Process. Technol.* 213 1640–52
- [2] Ragu Nathan S, Balasubramanian V, Rao A G, Sonar T, Ivanov M and Suganeswaran K 2023 Effect of tool rotational speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded DMR249A high strength low alloy steel butt joints for fabrication of light weight ship building structures *Int. J. Light. Mater. Manuf.* 6 469–82
- [3] Zahiri R, Sundaramoorthy R, Lysz P and Subramanian C 2014 Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding *Surf. Coatings Technol.* 260 220–9
- [4] Sada S O 2018 Minimization of Undercut Weld Defect Using the Response Surface Methodology Optimization Process *Niger. J. Eng.* 1–10
- [5] Ghosh N, Pal P K and Nandi G 2017 GMAW dissimilar welding of AISI 409 ferritic stainless steel to AISI 316L austenitic stainless steel by using AISI 308 filler wire *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* 20 1334–41
- [6] Thomasthekkuden D, Mourad A H I and Sherif M M 2020 Response surface analysis of statistical features of voltage and current in a GMAW powersource on welding v-groove joints 2020 *Adv. Sci. Eng. Technol. Int. Conf. ASET 2020*
- [7] Youn G G, Kim Y J and Miura Y 2021 Thermal aging effect on fracture toughness of GTAW/SMAW of 316L stainless steel: experiments and applicability of existing CASS models *Nucl. Eng. Technol.* 53 1357–68
- [8] Das S, Vora J J, Patel V, Li W, Andersson J, Pimenov D Y, Giasin K and Wojciechowski S 2021 Experimental investigation on welding of 2.25 Cr-1.0 Mo steel with regulated metal deposition and GMAW technique incorporating metal-cored wires *J. Mater. Res. Technol.* 15 1007–16
- [9] Ibrahim I A, Mohamat S A, Amir A and Ghalib A 2012 The effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) processes on different welding parameters *Procedia Eng.* 41 1502–6
- [10] Hu J and Tsai H L 2008 Modelling of transport phenomena in 3D GMAW of thick metals with

- v groove *J. Phys. D. Appl. Phys.* 41
- [11] Näsström J, Frostevarg J and Silver T 2015 Hot-wire Laser Welding of Deep and Wide Gaps *Phys. Procedia* 78 247–54
- [12] Hemaïd A, Tawfeek T and Gaheen O A 2016 An Investigation into Effect of Butt Welding Parameters on Weldment Mechanical Properties *Am. J. Mech. Eng.* 4 92–8
- [13] John M, Peraka A K and Kuruveri U B 2020 Effect of employing metal cored filler wire for single v butt joint welding of Ti-Nb microalloyed 800MPa steels *AIP Conf. Proc.* 2236
- [14] Riyadi T W B 2018 Elektroplating Ni/Cu pada Baja Karbon *Univ. Res. Colloq.* 8 224–30
- [15] Kovács J, Gáspár M, Lukács J, Tervo H and Kaijalainen A 2024 Comparative study about the results of HAZ physical simulations on different high-strength steel grades *Weld. World* 68 1965–80
- [16] Moravec J, Novakova I, Sobotka J and Neumann H 2019 Determination of grain growth kinetics and assessment of welding effect on properties of s700mc steel in the HAZ of welded joints *Metals (Basel)*. 9